

EL ORDEN DEL UNIVERSO

Mario Armando Higuera Garzón

* Físico y Astrofísico. Ex director Observatorio
Astronómico Nacional

El orden en el universo se puede determinar a través de la escala de los objetos del mundo natural, desde los objetos más pequeños que se pueden establecer hoy en día por medio de las observaciones microscópicas y los postulados de la mecánica cuántica, pasando por el orden de la escala natural del ser humano y llegando finalmente a la escala de lo macro del universo, de las grandes agrupaciones de galaxias. Al hablar de orden también hay que fijarse en la escala del orden geográfico.

En el siglo VI a.C. el pueblo griego desarrolla la capacidad de disgregar lo mítico y sobrenatural, de lo lógico y racional. **Tales de Mileto**, fundador de la escuela Jónica, concebía nuestro planeta como una superficie plana flotante sobre el agua, cubierta por una campana de aire producida por la evaporación de líquidos, los astros en el cielo cruzan las aguas de lo alto y recogen las exhalaciones de la Tierra.

Anaximandro, otro filósofo jónico, describe la Tierra como un cilindro aislado en el espacio con un cielo esférico rodeando al planeta, en el cielo los astros están colocados sobre ruedas tubulares opacas, que en ciertos puntos agujereados dejan ver el fuego interno, las ruedas giran alrededor del cilindro en una trayectoria circular; es sin duda la introducción del círculo en la cosmología.

En otro extremo del mundo griego a finales del siglo VI aparece la escuela pitagórica. El nombre de **Pitágoras** es familiar, sin embargo su figura es en gran parte desconocida y legendaria. Esta era una escuela mística y cerrada, apasionada por la ciencia y las matemáticas en donde los números rigen a los astros y determinan las notas musicales. En el ambiente pitagórico, Parménides introdujo en el siglo V a. C. una Tierra esférica en armonía con universo esférico.

Aparece bajo estos supuestos el problema de las antípodas, el arriba-abajo implicaría a un habitante del hemisferio opuesto estar cabeza abajo. Esta conclusión se vio pronto reemplazada por la convergencia de las verticales hacia el centro. Otra gran conquista del pensamiento griego fue la distinción clara de el día y la noche, que desde mucho tiempo atrás se suponían como vapores

brillantes y oscuros respectivamente, *¡La noche no es sino la ausencia de luz!, ¡la Luna brilla con la luz tomada del Sol!*

Anaxágoras, otro filósofo de la escuela jónica en el año 450 a.C. intuyó que la Luna así como los planetas deberían ser cuerpos sólidos como la Tierra; además describe exactamente la teoría de los eclipses- inmersión de la Luna por orden dentro de la sombra arrastrada por la Tierra- sin embargo Anaxágoras creía en una Tierra y una Luna planas. Si siete son los cuerpos celestes que cambian diariamente su ubicación en contraposición a la eterna quietud de las estrellas: el Sol y la Luna, que por sus tamaños no pasan inadvertidos, y los astros vagabundos cuyos nombres latinos son Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. El orden, tal como si se alejasen del Sol, no era aún claro para los griegos; múltiples fueron las combinaciones y distribuciones que tan sólo adquirieron su verdadero orden con el advenimiento de la propuesta copernicana.

Filolao, un pitagórico, construye un sistema centrado en el trono de Zeus como primer planeta Actictón (Anti-Tierra) un astro desconocido, luego a la Tierra y muy lejos, sobre el plano del Ecuador celeste, la Luna, el Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno; más allá las estrellas fijas, luego un fuego exterior y por último el infinito. El Sol toma su luz del fuego exterior, la Luna a su vez del Sol, excepto su luz cenicienta¹ reflejo del fuego central. El conjunto lo conforman 10 cuerpos celestes, número perfecto dentro de la concepción pitagórica. Resalta dentro de este sistema la posición secundaria de la Tierra, su forma esférica y como la esfericidad de los demás cuerpos; el sistema aparenta un heliocentrismo no del todo muy claro.

Platón vivió entre los años 427-347 a.C., para él como para sus discípulos el universo es armónico e inalterable de tal forma que el intelecto independiente de los sentidos es la fuente capaz de descifrarlo; los cambios observados en la naturaleza sólo son ilusiones que esconden la verdadera realidad "las ideas". Platón prestó poca atención a la observación científica, puesto que su interés radicaba en las ideas. En el Timeo expone su sistema geocéntrico, soportado sobre las ideas pitagóricas de la esfericidad terrestre y los movimientos planetarios. Platón propone a **Eudoxio** que estudie el problema del movimiento de las estrellas errantes. *¡La retrogradación de los planetas!* Eudoxio propone una solución geométrica basada en el movimiento de cuatro esferas en círculos centradas sobre la Tierra.

Entre los años 384-322 a.C. vivió **Aristóteles**, uno de los discípulos de Platón. Para él el mundo sigue un camino evolutivo dirigido hacia un objetivo o fin. La concepción Aristotélica del mundo marcó un único sentido para el hombre y para las cosas.

¹ Luz cenicienta. Es la luz del sol reflejada por la Tierra sobre la Luna, que hace débilmente visible la parte oscura de la luna durante su fase de cuarto.

El sistema Aristotélico entrelaza íntimamente la concepción del cambio y del movimiento con las teorías cosmológicas y de los elementos además de una teoría filosófica del ser. Desde el punto de vista filosófico la teoría del cambio es una *teoría finalista*. Todo cambio, en particular todo movimiento, tiene una finalidad, cumple un objetivo. Aristóteles observa que los cambios materiales no ocurren totalmente al azar, por ejemplo una semilla podrá convertirse eventualmente en un árbol pero no en un animal. Todo ser dice Aristóteles, es de dos maneras distintas: *Ser en acto* y *Ser en Potencia*. El ser en Acto comprende las propiedades y cualidades que el objeto posee en el momento presente. Sin embargo, el ser no termina en esas propiedades; de alguna manera el conjunto de todas las cualidades ausentes pero susceptibles de ser adquiridas por el objeto en el futuro, también forman parte del ser y constituyen lo que Aristóteles llama ser en Potencia. Desde este punto de vista el cambio debe considerarse como un proceso transitorio que lleva un objeto desde un punto inicial a uno final.

En su libro *“De los Cielos”* establece su cosmología: una estructura perfectamente ordenada y jerarquizada en la que cada uno de sus componentes ocupa un lugar determinado, *lugar natural* de acuerdo al valor que tenga. Retomando a Eudoxio, Aristóteles construye un universo finito y esférico, dividido en dos mundos: el Sublunar y el Supralunar, una rigurosa dicotomía entre cielo y tierra. Bajo la esfera de la Luna se localiza el centro del universo, la Tierra, cuerpo esférico que muestra su forma circular a través de los siguientes fenómenos:

- La forma como se va perdiendo un barco al alejarse de la orilla en mar abierto, (primero el casco y por último la vela).
- El cambio de altura de la estrella polar en viajes largos, como Aristóteles mismo lo estimó entre Egipto y Grecia.
- Los eclipses de Sol y Luna.

El mundo sublunar está compuesto por cuatro elementos: Tierra, Agua, Aire y Fuego, es el lugar de la imperfección, la inexactitud y el cambio continuo. Sobre la esfera de la Luna tenemos el lugar de lo inmutable e incorruptible, caracterizado por la quinta esencia el “Eter”; los cuerpos allí colocados poseen movimientos circulares. Aristóteles introduce también una división entre los movimientos: Naturales y Violentos. En el mundo supralunar están los planetas y estrellas puestos sobre esferas homocéntricas, separadas unas respecto a las otras por complejos engranajes o esferas neutralizantes, conformando un total de 56 estructuras.

El *espacio* para Aristóteles es la suma de los lugares ocupados por los cuerpos:

“...las tendencias de los elementos físicos demuestran no solamente que la localidad o el lugar es una realidad sino que también ella ejerce una influencia activa porque el Fuego y la tierra son atraídos el uno hacia arriba y el otro hacia abajo...”

El Espacio aristotélico es una entidad absoluta y dinámica condicionada por las propiedades geométricas del cosmos; el vacío concebido como privación de toda propiedad es rechazada “Sin lugar Natural”.

Un sistema centrado en la Tierra es lo que a los sentidos mejor describe las cosas. Tal como lo expresa Aristóteles, la Tierra tendrá que estar en reposo y ser el centro del universo pues de lo contrario una piedra lanzada desde lo alto de un muro o montaña no caería exactamente sobre la línea vertical sino que se desplazaría ya sea en la misma dirección o en dirección contraria al movimiento. Como este efecto no se observa al llevar a cabo la experiencia, es lógico suponer que no es cierto. Por otra parte, si se observa durante varios meses el movimiento de Marte, se puede apreciar cómo el planeta no avanza siempre en un sentido sino que durante un período de tiempo cambia su dirección de movimiento.

La cosmología Aristotélica parte del hecho de movimientos circulares para los cuerpos del mundo supralunar: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno y la esfera última de las Estrellas Fijas (límite del universo). Ajustar las complicadas trayectorias seguidas por las estrellas errantes fue una tarea que duró más de cuatro siglos. Con Ptolomeo se llega a una solución que aún por su carácter ingenioso, no deja de ser incorrecta.

En 1543, año de su muerte, el clérigo, astrónomo y pensador neoplatónico polaco **Nicolás Copérnico** publica en Nuremberg, el libro *De revolutionibus orbium caelestium*. Este esfuerzo científico es impulsado por **Georg Von Launchen (Rheticus)**.

Copérnico sintió una gran admiración por Ptolomeo y su obra, su objetivo era construir un sistema planetario tan complejo como el mostrado en el Almagesto y encontrar el verdadero orden del universo.

“...La mayor parte de los elementos esenciales que asociamos a la revolución copernicana, a saber, los cálculos fáciles y precisos de las posiciones planetarias, la abolición de los epiciclos y de las excéntricas, la desaparición de las esferas, la idea de un Sol semejante a las estrellas y la de un universo infinito en extensión, así como muchas otras, no aparecen por parte alguna en la obra de Copérnico. Excepto en lo que se refiere al movimiento terrestre, el De revolutionibus parece desde todos los puntos de vista más estrechamente vinculado a las obras de los astrónomos y cosmólogos de la antigüedad y de la Edad Media que a las generaciones posteriores. Fueron estas últimas que, basándose en los trabajos de Copérnico, pusieron de manifiesto las radicales consecuencias que derivaban del texto copernicano... (La revolución Copernicana, Thomas Kuhn).

Veintiséis años después de la muerte de Copérnico, el 11 de noviembre de 1572, el joven danés **Tycho Brahe**, en la abadía de Heridsvag, observa con asombro la aparición de una nueva estrella en el firmamento,. En 1575 Brahe escribe un libro

acerca de sus observaciones que se prolongaron hasta al año 1574 y le dieron fama como el astrónomo más importante de la época.

Tycho Brahe nace en el año de 1546 y es tomado en adopción por su tío Jörgen el cual carecía de descendencia. Jörgen que era una persona acaudalada apoyó con exagerada complacencia todos los caprichos de Tycho. En 1559 va a la universidad de Copenhague y en 1560 observa un eclipse que lo apasiona y le deja asombrado puesto que las efemérides lo habían pronosticado. Compró las obras completas de Ptolomeo así como unas tablas de estrellas. Su interés más que científico estaba enmarcado dentro de las teorías astrológicas muy trabajadas durante estos años, de las cuales Kepler fue también uno de sus seguidores.

En 1575 Brahe se instala en la isla de Hven y allí construye el primer observatorio moderno, el "Uraniborg". Este palacio disponía de muchas comodidades además de algunas excentricidades, cada habitación estaba conectada a un sistema de distribución de agua, además de un sistema de teléfono primitivo, el cual consistía de tubos con estatuas en sus extremos por los cuales se enviaban los mensajes; poseía su propia imprenta y era la base de suntuosos banquetes.

En instrumentación el Uraniborg tenía uno de los últimos logros en la tecnología astronómica: Una esfera almilar ecuatorial con un anillo de declinación de 2,74 metros de diámetro, además de un gran número de compases: sextantes (60) y cuadrantes (90), en estos últimos el más preciso, el "cuadrante mural".

Tycho fue un excelente observador, sus medidas astronómicas eran sorprendentemente exactas a pesar de que no utilizó ningún instrumento óptico. Creó mapas estelares, midió la duración del año con tan sólo un error de un segundo; estudió y corrigió la refracción que produce la atmósfera sobre la luz procedente de las estrellas. Las observaciones de los planetas fueron las más precisas efectuadas hasta entonces; observó el cometa de 1577 y midió su paralaje desplazándose desde el observatorio en Hven hasta Praga. Las mediciones le llevaron a concluir que el cometa estaba más allá de la órbita de la Luna, también observó los cometas que aparecieron en 1580, 1585, 1590, 1593 y 1596.

A pesar de su gran habilidad como observador, no compartió el modelo copernicano, su oposición no partía de razones personales sino astronómicas. Si la Tierra girase en torno al Sol cambiaría con respecto al fondo estelar durante un año, por tanto debería poder medir el paralaje de las estrellas más cercanas; sus observaciones meticulosas no lograron medir ninguno, lo que le llevó a desechar la propuesta heliocéntrica. Aunque el astrolabio utilizado por Brahe era de los mejores hasta ese momento construido, su precisión no era lo suficientemente alta como para medir estos ángulos, además Tycho no imaginaba las enormes distancias a las que están aún las estrellas más cercanas.

En 1597, a sus 50 años, parte de Hven con todo un séquito de personas, libros e instrumentos y se establece en el castillo de Benatsky en Praga, donde se encuentra con **Johanes Kepler**, un joven matemático que se convertiría en el astrónomo más grande de Europa.

“Del estudio de la órbita de Marte, debemos alcanzar los secretos de la Astronomía o mantenernos por siempre en la ignorancia de ella” Johannes Kepler.

Un día del año 1595 en la ciudad de Graz, Kepler dibujó en una pizarra un triángulo inscrito en una circunferencia, con otra en su interior. Hacía meses que venía trabajando en las distancias de los planetas al Sol y al ver la figura tuvo una revelación fulminante: *“si un triángulo equilátero se inscribe en una circunferencia y otra se traza dentro de él, la relación de tamaño de las dos curvas cerradas es siempre la misma, por grandes que sean”*; tal relación, pensó Kepler, sería la que existiría entre las órbitas de Saturno y Júpiter. El espacio es tridimensional y por lo tanto triángulos encerrados en circunferencias no son la solución real. Persuadido por su descubrimiento se puso a investigar qué sólidos tridimensionales caben en una esfera de tal forma que los vértices toquen la superficie.

Existen cinco de tales sólidos pitagóricos perfectos: a. el cubo, seis cuadrados; b. el tetraedro, pirámide de cuatro triángulos equiláteros; c. el octaedro, ocho triángulos equiláteros; d. el dodecaedro, doce pentágonos y el icosaedro, veinte triángulos equiláteros.

Realizados los cálculos, Kepler estructuró un sistema tal que el cubo encaja entre las órbitas de Saturno y Júpiter, el tetraedro entre las órbitas de Júpiter y Marte, el dodecaedro entre Marte y la Tierra, el icosaedro entre la Tierra y Venus y finalmente el octaedro entre las órbitas de Venus y Mercurio; es de anotar que en el siglo XVI aún no se conocía la existencia de Urano, Neptuno y Plutón.

Con gran interés, Kepler escribe el *Misterio Cosmográfico* en donde expone sus descubrimientos; el libro es impreso en los talleres del alma máter de Tubinga bajo la supervisión de su maestro en astronomía **Maestlin**. En el *Misterio* Kepler muestra la existencia de pequeñas discrepancias con respecto a las observaciones, pero sin embargo estaba convencido que los nuevos datos y el refinamiento de los cálculos confirmarían la verdad de su intuición. Tycho Brahe recibe el *Misterio* e invita a Kepler a pasar un tiempo en su casa, sin embargo estaban tan separados en distancia que a este último le quedaba imposible desplazarse.

En 1600 se clausura la escuela reformista de Graz por un edicto contra los protestantes ordenado por el archiduque Fernando de Estiria. Aunque Kepler se consideraba teológicamente neutral, su futuro quedaba limitado. Un consejero del emperador Rodolfo II le invita a unirse a su cortejo en camino hacia la ciudad de Praga. Kepler se puso en marcha a la capital de Bohemia el 1 de enero de 1600.

En el castillo de Benatsky se reúnen Kepler y Brahe bajo un ambiente de celos profesionales; los dos eran maestros en sus respectivas áreas, ninguno quería ceder frente al otro. Brahe se aferró a sus datos como un tacaño a sus posesiones y sólo se los hacía saber a Kepler en forma de comentarios sueltos durante las comidas.

En octubre de 1601, algunos días después de una exhuberante comida en la casa de un noble, muere a los 54 años Tycho Brahe y entonces Kepler asume el puesto de matemático imperial del emperador Rodolfo II. Kepler se apodera de los manuscritos de Brahe y continúa su trabajo; pronto se da cuenta que las observaciones de Marte revelan una órbita asimétrica además, los datos mostraban que la velocidad de movimiento del planeta no era constante, se acelera al acercarse al Sol y se reduce al alejarse de él.

Después de un año de estudios y análisis, además de haber introducido una fuerza invisible entre el Sol y los planetas, construye una órbita aproximadamente elíptica en donde a través de una cinta elástica imaginaria que encadena al Sol con el cuerpo, lo pone a barrer áreas iguales en tiempos iguales. Había descubierto la ley fundamental del movimiento planetario.

Kepler no estaba convencido de que la elipse fuese la figura exacta de la órbita, tan sólo después de algún tiempo de enunciada la ley de las áreas clarificó sus ideas y la adoptó formalmente. Nueve años después, examinando las tablas que muestran la distancia de los planetas al Sol y los tiempos que tardan en girar en torno a él, descubre la ley de las proporciones.

Con Johannes Kepler la ciencia astronómica llega a su mayoría de edad, dejando atrás las especulaciones metafísicas de las cuales partió. Kepler no era un astrólogo convencido sin embargo tenía la convicción de que los astros influyen en nuestro mundo *“Nada existe ni ocurre en el firmamento visible que no sienta de algún modo las facultades de la Tierra y la naturaleza”*.

En 1609 aparece publicada *La Nueva Astronomía* en donde muestra sus dos primeras leyes, pero al igual que *Sobre las Revoluciones* de Copérnico, no tuvo mucha resonancia, la razón era elemental, los grandes sabios de la antigüedad habían mostrado que las órbitas de los astros eran circulares.

Entre 1619 y 1627 Kepler publica sus tres últimas obras, en primer lugar el libro *La Armonía del Mundo* en cuya página titular expresaba *“Es verdad lo que aquí sustento”*, allí presenta su tercera ley; después *Epítome de la astronomía copérmica* y, por último, *las Tablas Estelares Rodolfinas*, un encargo que el emperador le había hecho de tiempo atrás. El pensamiento de Kepler fue una mezcla de razonamientos lógicos y matemáticos inmersos dentro de un ambiente místico y metafísico, comprendió instintivamente que faltaba algo más para poder descifrar el comportamiento del universo: la gravedad.

La relación entre el tamaño de los objetos y la distancia a la que se encuentran del observador es de uso diario en cualquier actividad. Los valores asignados intuitivamente a los tamaños lineales de los objetos son convertidos en el cerebro en medidas angulares aparentes y de hecho se establece una escala de distancias al observador, sin embargo al estimar la separación entre objetos colocados sobre la esfera celeste surgen dificultades por carecer de cuerpos de comparación.

La paralaje es una herramienta que utiliza el hecho de comparar la posición de cuerpos cercanos con respecto a otros lejanos y desde dos posiciones diferentes, bajo este criterio los primeros parecen desplazarse sobre el fondo marcado por los demás, si se determina el ángulo de separación y la longitud de una línea base se podría calcular la distancia. Un ejemplo básico de paralaje se tiene cuando se coloca uno de los dedos en frente de la nariz, algo separado de ella y se observa un cuerpo en el fondo de una habitación; si alternadamente se observa el dedo con uno de los ojos y después con el otro, se apreciará su desplazamiento aparente con respecto al fondo.

En aplicaciones astronómicas la paralaje es igual a la mitad del ángulo formado por dos líneas que se interceptan en el objeto de estudio y que parten de una misma línea base; dado que las distancias estelares son muy grandes, es necesario utilizar una línea base suficientemente larga.

Un procedimiento similar se puede establecer para estrellas cercanas. Debido a que los desplazamientos aparentes son muy pequeños, se hace necesario recurrir a mediciones microscópicas de un campo de estrellas sobre placas fotográficas durante un intervalo de seis meses. Del triángulo formado por el Sol, la Tierra y la estrella se tiene la siguiente relación trigonométrica,

$$\tan \pi = \frac{ST_2}{ES} \quad (1)$$

sin embargo, si el ángulo es menor que 3° (siempre es así para paralajes estelares) y de la conversión de un ángulo π en radianes a un ángulo π en segundos, se obtiene,

$$\text{Distancia} = \frac{206265 \text{ U.A.}}{\pi''} \quad (2)$$

Si el paralaje es de 1 segundo de arco se define la distancia de 1 parsec, entonces 1 parsec = 206.265 unidades astronómicas. Bajo esta conversión se obtiene finalmente

$$\text{Distancia} = \frac{1}{\pi''} \text{ pc}, \quad (3)$$

en donde π'' = paralaje en segundos de arco y d = distancia en parsecs. En años luz un parsec es igual a 3,26.

ASTROFÍSICA

Las técnicas astrométricas de paralaje han permitido calcular distancias estelares dentro de un radio de 20 parsecs. Sin embargo, el lanzamiento del satélite Hiparco por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el trabajo astrométrico realizado desde 1989 hasta 1993, han permitido determinar la distancia de aproximadamente 100.000 estrellas, situadas dentro de un radio de 500 años luz.

Con el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de observación, se ha comprendido que el universo es un gigantesco laboratorio natural en donde se encuentran las más variadas condiciones de temperatura, densidad y campos, entre otras. Estas condiciones en la mayoría de los casos son irrepetibles y difícilmente alcanzables en los laboratorios terrestres. El físico del universo debe estar alerta de su observación, análisis y obtención de resultados.

¿Cómo se sabe tanto sobre la composición química, temperatura, presión y movimiento de estrellas y galaxias que están distantes del Sol? Para contestar esta pregunta basta saber que existen dichos cuerpos pues su realidad se pone de manifiesto con la emisión de energía en forma de ondas de luz, ondas infrarrojas, ultravioletas, ondas de radio y rayos gamma. Esta energía viaja a través de vastas distancias proveyendo una fuente extraordinariamente rica de información sobre su constitución y otras propiedades.

La *astrofísica* es aquella parte de la astronomía que se ocupa de estudiar las propiedades, constitución y evolución de los cuerpos celestes y las regiones del espacio que existen entre ellos. Principalmente se ocupa de la producción y el gasto de energía en cuerpos tales como las estrellas y las galaxias y de cómo dicho gasto tiene que ver con la evolución de dichos objetos. Es claro que su avance está estrechamente ligado a los adelantos que se realizan en muchos campos de la física propiamente dicha. Es así como la astrofísica reúne áreas tales como la física de partículas, física de plasmas, física del estado sólido, termodinámica, relatividad general, mecánica cuántica.

Muchos de los átomos de los que están hechos los seres vivos fueron construidos hace miles de millones de años en los interiores estelares, que en algunos casos explotaron y en otros se desvanecieron calladamente en el universo. ¿Cómo han descubierto los astrónomos y los astrofísicos esta increíble historia? Gran parte de ella ha sido constituida observando el cielo, usando las técnicas de la espectroscopia y fotometría astronómica, y trabajando en el laboratorio.

Las observaciones de la luz proveniente de las estrellas se expresan generalmente en magnitudes. La magnitud de un astro es la medida logarítmica de su luminosidad, tal que las estrellas más brillantes tienen valores bajos de magnitud y las más débiles tienen valores grandes de magnitud. Esta distribución de valores fue establecida por el astrónomo griego **Hiparco**, aproximadamente en el siglo segundo A.C., cuando asignó a las estrellas las visibles a ojo desnudo magnitudes entre 1^m y 6^m (Una magnitud Z , se representa con el símbolo Z_m).

El astrónomo británico **Norman R. Pogson** (1856) define la escala moderna de magnitudes con base en comparar el brillo de una estrella de primera magnitud con respecto a una de sexta. Así si una estrella de primera magnitud es del orden de 100 veces más brillante que una de sexta, entonces la razón de brillo entre dos clases n y $n + 1$ deberá ser 2.512.

Para eliminar el efecto de distancia y comparar adecuadamente el brillo de los objetos celestes, se hace necesario introducir una escala absoluta. Por tanto hay que calcular el brillo que tendrán las estrellas tal como si estuviesen colocadas a una distancia dada de referencia.

LA MAGNITUD ABSOLUTA M

La densidad de flujo de una estrella depende del brillo intrínseco y de la distancia a la cual se realiza la observación. Por esta razón y debido a que las estrellas están situadas a diferentes distancias de la Tierra, las magnitudes aparentes no dan información específica sobre el brillo intrínseco de ellas. Una cantidad que mide este brillo intrínseco es la *magnitud absoluta* M , que se define como la magnitud aparente de una estrella si es observada a una distancia estándar de 10 pc.

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (4)$$

Aunque se han alcanzado grandes logros en la determinación de distancias, los métodos de triangulación no funcionan para estrellas situadas a distancias superiores de 150 parsecs debido a que el ángulo de paralaje es muy pequeño para medirlo aún con la precisión del satélite Hiparco. Sin embargo, un nuevo método denominado Paralaje Espectroscópico se ha desarrollado como herramienta alternativa.

Con la información que se puede tomar del espectro de una estrella desconocida se extraen dos piezas vitales, la primera su tipo espectral (OBAFGKM) y la segunda su clase de luminosidad (i.e., sea que la estrella esté en la secuencia principal, o sea una gigante o una supergigante). Con estas dos cantidades determinadas espectroscópicamente, se sabe con certeza dónde está ubicada la estrella en el diagrama H-R; en otras palabras, se puede extrapolar directamente su magnitud absoluta M . Si se mide su magnitud aparente, la diferencia $m - M$ no es

más que el módulo de distancia a la que correspondería una distancia dada en parsecs.

Existe un tipo especial de estrellas variables, estrellas cuya magnitud cambia en períodos relativamente cortos, denominadas *cefeidas*. Se denominan cefeidas porque la primera estrella de este tipo en ser descubierta fue δ Cephei. Son estrellas supergigantes y además pulsantes, esto es, estrellas cuya variación de brillo es periódico. Los pulsos se deben a movimientos más o menos rítmicos de las capas exteriores de la estrella: la estrella se expande permaneciendo esférica pero cambiando de volumen. Los períodos de pulsación de las cefeidas están entre 1 y 50 días y se han descubierto del orden de 700 en nuestra galaxia. Es claro entonces que el radio de la estrella cambiaría, al igual que su temperatura superficial y por tanto su magnitud.

La astrónoma norteamericana **Henrietta Leavitt** descubrió un fenómeno sorprendente en las estrellas cefeidas: una gráfica entre el logaritmo del período en días y la magnitud absoluta M da una línea recta lo que indica que hay una conexión directa entre el período de la pulsación y la luminosidad de la estrella, llamada relación período-luminosidad.

La función lineal es de la forma:

$$M = a \log P + b \quad (P \text{ en días}). \quad (5)$$

donde a y b son dos constantes que se pueden hallar directamente de la gráfica.

Esta relación resultó ser una herramienta muy útil para determinar distancias a galaxias. Supongamos que se descubre una cefeida en una galaxia de la que ignoramos su distancia a la Tierra. Mediante la observación astronómica continuada es posible medir la curva de luz de la estrella, esto es, medir por varios días su magnitud aparente hasta obtener el período de la pulsación. Tomando el logaritmo de este valor y extrapolando en la gráfica se puede encontrar la magnitud absoluta M correspondiente a ese valor. Sabiendo tanto m como M el problema de hallar la distancia queda resuelto a través de la ecuación (4).

La primera estimación de la distancia de la galaxia Andrómeda fue hecha a través de las cefeidas observadas en ella. De correcciones hechas en las magnitudes absolutas de las estrellas variables W Virginis se debió corregir las estimaciones para las cefeidas, revisión del astrónomo **Walter Baade**. Los trabajos actuales manejan, salvo pequeñas correcciones, los estimativos de Baade.

Las cefeidas se clasifican en dos grupos: las del grupo I cuya representante es δ Cephei, llamadas cefeidas clásicas y las del grupo II, W Virginis, que poseen una magnitud 1.5 veces más débiles que las correspondientes a cefeidas clásicas. La

diferencia entre estos dos tipos es que las cefeidas clásicas son de población I, es decir, estrellas jóvenes ubicadas en los brazos espirales sobre el plano galáctico; las W Virginis, son estrellas de población II, lo que significa que son estrellas viejas ubicadas en el centro galáctico o en el halo. Otro tipo de estrellas pulsantes son las RR Lyrae, también de población II pero con períodos de pulsación inferiores a un día. Por lo general se encuentran en los cúmulos globulares.

Hoy en día el Telescopio Espacial Hubble está llevando a cabo una búsqueda sistemática de cefeidas en la galaxia M100. Con base en la relación período luminosidad encontrado por Leavitt, se ha determinado un nuevo valor para la constante de Hubble que permite afirmar que la edad del universo oscila entre 8 y 12 millones de años.

La escala de distancias en el universo muestra que en diferentes órdenes de magnitud se encuentran diferentes estructuras con sus variadas formas y componentes y que, entre sí, ellas configuran el orden del universo "kósmos".